

柱状竹炭基肥挤压造粒成型工艺的研究

魏春辉¹, 任奕林^{1*}, 苑晓辰¹, 邓宇玄¹, 周广生²

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 华中农业大学植物科学技术学院, 武汉 430070)

摘要: 为探索挤压造粒工艺对竹炭和木醋液加以利用, 用来制备成型质量优良的柱状竹炭基肥, 将自制的挤压成型模具与万能试验机相结合搭建挤压造粒平台。以抗渗水性、密度和抗压强度作为成型质量的综合评价指标, 通过单因素试验来考察粘结剂种类、粘结剂添加量、竹炭含量、成型压力和模孔孔径 5 个因素对试验指标的影响情况; 在此基础上, 又进行了正交试验, 筛选最佳成型工艺。试验结果表明, 粘结剂种类、粘结剂添加量、成型压力和模孔孔径对抗压强度有显著影响, 竹炭含量对抗压强度影响不显著; 粘结剂种类、粘结剂添加量和模孔孔径对抗渗水性影响显著, 竹炭含量、成型压力对抗渗水性影响不显著; 粘结剂种类、竹炭含量对密度影响显著, 其他因素对密度影响不显著。运用综合平衡法得到的最佳组合方式为: 竹炭含量 50%、粘结剂为木质素磺酸钠、粘结剂添加量为 20%、成型压力为 10 MPa、模孔孔径为 5 mm。此条件下, 成型质量最佳, 抗压强度为 36.90 N, 密度为 1.190 g·cm⁻³, 抗渗水性为 93.45 min。

关键词: 竹炭; 木醋液; 生物炭基肥; 挤压造粒; 成型

中图分类号: S216

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)05-0947-06

Research on extrusion granulation forming process of columnar bamboo charcoal based fertilizer

WEI Chunhui¹, REN Yilin¹, YUAN Xiaochen¹, DENG Yuxuan¹, ZHOU Guangsheng²

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070;

2. College of Plant Science & Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070)

Abstract: In order to explore the use of extrusion granulation technology to prepare high quality columnar bamboo charcoal based fertilizer using bamboo charcoal and wood vinegar, the homemade extrusion molding device and universal testing machine were combined as an extrusion granulation platform. Single factor experiment was carried out, employing compressive strength, water resistance, and density as comprehensive judging indexes, to examine the effect of binder type, binder content, bamboo charcoal content, forming pressure, and die aperture on test index. On this basis, an orthogonal experiment was carried out to screen the best molding process. The results showed that binder type, binder content, molding pressure and die aperture had significant effects on the compressive strength, while compressive strength influenced by bamboo charcoal content was not significant. The water resistance was remarkably influenced by binder type, binder content and die aperture, while it was not significant affected by bamboo charcoal content and forming pressure. The binder type and bamboo charcoal content showed significant impacts on the density, while other factors had no significant effect on the density. The best combination by means of comprehensive balance method was 50% of bamboo charcoal content, sodium lignin sulfonate being binder type, 20% of binder content, 10 MPa of molding pressure, and 5 mm of die aperture. Under the conditions, the compressive strength, density and water resistance were 36.90 N, 1.190 g·cm⁻³, and 93.45 min, respectively.

Key words: bamboo charcoal; wood vinegar; biochar-based fertilizer; extrusion granulation; forming

收稿日期: 2016-10-08

基金项目: 国家科技支撑项目 (2014BAD11B03) 和中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2014PY044) 共同资助。

作者简介: 魏春辉, 硕士研究生。E-mail: weichunhuixyz@126.com

* 通信作者: 任奕林, 博士, 副教授。E-mail: renyiling@mail.hzau.edu.cn

中国农作物秸秆数量巨大, 据报道, 每年秸秆总量可达 $6\sim 8\times 10^8$ t^[1]。将这些生物质在低氧甚至无氧条件下加热裂解可得到生物炭^[2]。生物炭施入土壤, 可改良土壤^[3-4], 减少温室气体的排放^[5], 提高农作物产量^[6-7]。Schulz 和 Glaser^[8]指出, 将生物炭与肥料掺混使用, 可对作物生长起协同作用。此外, 生物炭还可作为载体, 与肥料混合制成生物炭基肥^[9-10]。它不仅赋予肥料养分缓慢释放特性, 而且对作物有更稳定的增产作用。

目前, 生物炭基肥制备工艺主要有掺混法、包膜法、吸附法、反应法和挤压造粒法等。Steiner 等^[10]利用掺混法制备的生物炭基肥, 可以延长氮素供应时间。钟雪梅等^[11]以竹炭来包膜尿素生产出的包膜肥, 在盆栽试验条件下, 氮素利用率提高了 10%~25%。Khan 等^[12]利用含氮、磷、钾的肥料溶液来浸渍木炭, 借助于木炭的吸附性制备出了木炭基复合肥, 将其置于模拟的土壤溶液中, 发现养分淋失缓慢。张雯等^[13]先将生物炭和硝酸溶液混合, 再向其中加入氨水, 经过反应和吸附的双重作用, 制得的生物炭基氮肥对氮素有良好的控释效果。马欢欢等^[14]利用挤压造粒法制得的秸秆炭基肥料机械强度达到 85% 以上。掺混法是最简单的工艺^[15], 往往是直接掺混即可。吸附法一般是先吸附 24 h^[12,16], 再烘干得到成品, 耗时较长。反应法主要是化学变化, 其他 4 种基本上为物理变化。反应法往往要借助于反应和吸附的双重作用, 操作比吸附法更复杂, 但通常更有优势。张雯等^[13]分别采用掺混法、吸附法和反应法将生物炭与硝酸铵复合来制备生物炭基氮肥, 并对其进行了缓释特征分析, 发现反应法制得的生物炭基氮肥在对硝酸铵的吸持方面比掺混法和吸附法更有优势。通过掺混法、吸附法和反应法生产的生物炭基肥多为粉状颗粒, 未经成型, 不便于运输、储存; 在施用过程中不利于机械化作业, 易造成粉尘污染^[17]; 不利于规模化和产业化发展。而包膜法和挤压造粒法制成的多为成型的生物炭基肥, 可以避免上述弊端。但是包膜法制得的成型颗粒强度和密度较小, 易碎, 生产效率较低。挤压造粒法可以有效克服这些缺点, 而且操作简便, 适宜大规模生产, 发展潜力巨大。

农作物秸秆在制备生物炭过程中会产生副产品, 木醋液就是其中之一。袁艳文^[18]指出若不能充分利用木醋液等副产品, 则用农作物秸秆来制取生物炭, 可能会比将秸秆废弃危害更大。张忠河等^[19]指出若不处理木醋液, 会造成二次污染。研究发现, 木醋液可作为土壤改良剂^[20-22]、抗菌杀虫剂^[23], 也

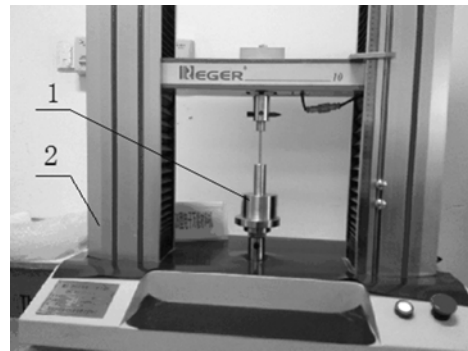
可与生物炭、肥料混合制成新型肥料^[24], 这为木醋液的利用提供了有效途径。

目前主要是用包膜法^[11]和吸附法^[25]对竹炭加以利用来制备炭基肥, 而用挤压造粒法尚未见报道。本研究以竹炭作为缓释载体, 添加适量木醋液稀释液, 用挤压造粒法来制备具有一定缓释性、抗菌杀虫、改良土壤的多功能型柱状生物炭基肥。对影响因素及工艺参数进行了试验研究, 为柱状竹炭基肥的挤压造粒制备工艺及成型设备的设计提供参考。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

1.1.1 试验材料 肥料粉(尿素、磷酸一铵、氯化钾, 均为分析纯), 竹炭粉(由时科生物科技(上海)有限公司生产), 精制膨润土(由天元非金属制品有限公司生产), 木醋液(由遂昌县潘氏炭厂生产), 可溶性淀粉(分析纯), 木质素磺酸钠(分析纯), 海藻酸钠(分析纯), 蒸馏水。



1.挤压成型模具; 2.万能试验机

1.Extrusion forming mold; 2.Universal testing machine

图 1 挤压成型

Figure 1 Extrusion forming

1.1.2 试验设备 挤压成型模具(自制), RGM-6010 型电子万能材料试验机(深圳市瑞格尔仪器有限公司), AUY220 型分析天平, DHG-9240A 型电热恒温鼓风干燥箱(武汉环试检测设备有限公司), 直尺, 小刀, 秒表等。

1.2 试验方法

1.2.1 柱状竹炭基肥制备 将称量好的竹炭粉、膨润土、粘结剂和肥料粉(其中, 肥料粉占总物料百分比为 20%, 尿素:磷酸一铵:氯化钾=2:1:2)混合均匀。然后, 向其中添加占总物料百分比为 20% 的木醋液稀释液(木醋液和水按质量 1:2 混合配制而成), 边加木醋液稀释液, 边揉捏, 便可制得品质均匀的软材。称取一定量的软材, 将其放进圆筒里, 压杆(与万能试验机用销子相连)在万能试验机下压力

的带动下, 将软材挤压成型, 制得柱状竹炭基肥。将其切成相等长度 (6 mm), 并置于烘箱中, 在 45 °C 下烘干至恒重, 制得样品。挤压成型如图 1 所示。

1.2.2 抗渗水性的测定 将等量样品放入装有 100 mL 水的烧杯中, 用秒表记录下样品因吸水胀大失去原有形态的时间。重复试验 3 次, 取平均值。

1.2.3 密度的测定 由直径 D 、长度 L , 可得体积 $V = \pi D^2 L / 4$ 。由分析天平测出样品质量 M , 再由公式 $\rho = M / V$, 计算出密度。

1.2.4 抗压强度的测定 将样品放在万能试验机上下 2 个压板之间, 下压板固定不动, 设置上压板下压速度为 $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。当力随位移变化的曲线开始下降时, 记下峰值点的力, 该值为样品受压的最大变形力。重复试验 5 次, 取最大变形力的平均值, 来作为抗压强度^[26]。

1.3 试验设计

所制肥料应该结构致密, 在运输、储存中应具有一定的抗破碎、抗受潮能力^[27]。因此, 以抗渗水性、密度、抗压强度作为成型质量评价指标。以粘结剂种类、粘结剂添加量 (粘结剂占物料总重的百分比)、竹炭含量 (竹炭占膨润土和竹炭粉总重的百分比)、成型压力和模孔孔径作为考察因素, 进行单因素试验和正交试验。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 粘结剂种类 经过探索性试验, 选定成型压力为 7.5 MPa, 竹炭含量为 60%, 粘结剂添加量为 15%, 模孔孔径为 5 mm, 分别对粘结剂为可溶性淀粉、木质素磺酸钠和海藻酸钠 3 个水平进行考察, 得粘结剂种类对试验指标的影响, 如图 2 所示。

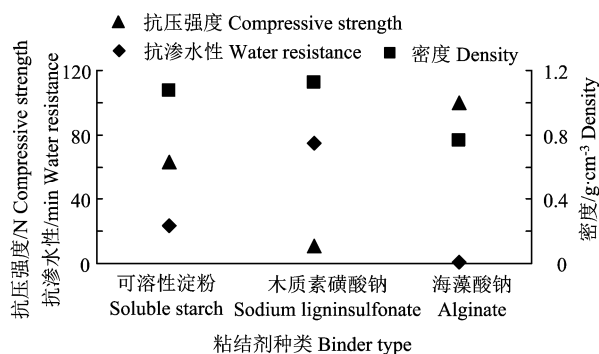


图 2 粘结剂种类单因素试验结果

Figure 2 Single factor test results of binder type

由图 2 可知, 粘结剂为海藻酸钠时, 所造肥料抗压强度最大, 而抗渗水性和密度最小; 而当粘结

剂为木质素磺酸钠时, 反之; 粘结剂为可溶性淀粉时, 3 个指标均居中。对试验数据进行方差分析表明, 粘结剂种类对 3 个指标均影响显著。

2.1.2 粘结剂添加量 选定粘结剂种类为可溶性淀粉, 成型压力为 7.5 MPa, 竹炭含量为 60%, 挤压孔径为 5 mm, 分别对粘结剂添加量 5%、10%、15%、20% 和 25% 5 个水平进行考察。作出试验指标与粘结剂添加量的关系曲线。

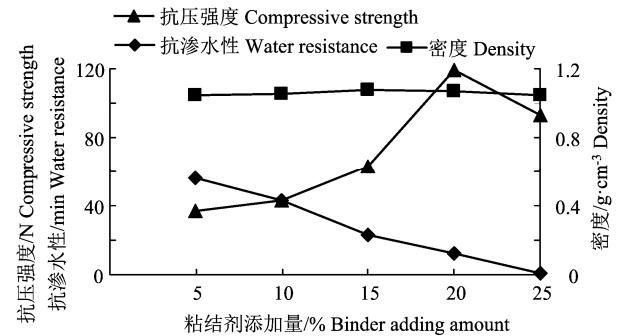


图 3 粘结剂添加量单因素试验结果

Figure 3 Single factor test results of binder adding amount

试验结果 (图 3) 表明, 随着粘结剂添加量的增大, 抗渗水性近似直线般地下降。可能是因为, 粘结剂的增加使得吸水能力增强。而抗压强度是先逐渐增大, 当粘结剂添加量为 20% 时, 达到最大, 然后有所下降。可见, 并非粘结剂越多, 物料颗粒间的粘结力就越大。同时, 粘结剂添加量的改变对密度影响不大。粘结剂添加量为 15% 时, 3 个指标都较合适。方差分析表明, 粘结剂含量对抗渗水性、抗压强度影响显著。

2.1.3 竹炭含量 选定粘结剂添加量为 15%, 粘结剂为可溶性淀粉, 成型压力为 7.5 MPa, 挤压孔径为 5 mm, 分别对竹炭含量的 50%、60%、70%、80% 和 90% 5 个水平进行考察。作出试验指标随竹炭含量变化的曲线, 如图 4 所示。

由于生物炭几乎没有粘性, 它的增加, 并不能使粘结力发生很大变化。生物炭的多孔结构, 有助于增强肥料的吸水能力, 而使抗渗水性降低, 不过, 作用并不明显。生物炭容重小的特点, 使得密度随着竹炭含量增加而明显减小。竹炭含量为 50% 时, 3 个指标均最大。方差分析表明, 竹炭含量对密度影响显著。

2.1.4 成型压力 选定竹炭含量为 50%, 粘结剂为可溶性淀粉, 粘结剂添加量 15%, 挤压孔径为 5 mm, 分别对成型压力 2.5、5、7.5 和 10 MPa 4 个水平进行考察。3 个指标随成型压力的变化, 如图 5 所示。

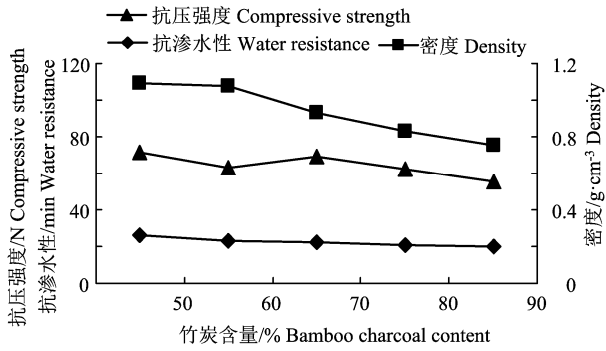


图 4 竹炭含量单因素试验结果

Figure 4 Single factor test results of bamboo charcoal content

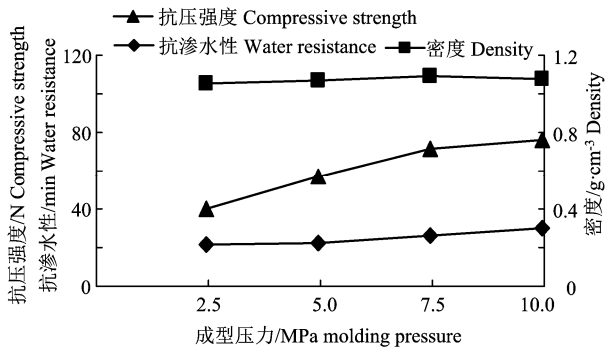


图 5 成型压力单因素试验结果

Figure 5 Single factor test results of molding pressure

试验结果(图5)表明,随着成型压力的增大,密度和抗渗水性整体上保持增大的趋势,不过增大

作用并不显著。在一定范围内,成型压力越大,抗压强度也越大,但达到某值后,影响作用减弱。成型压力为10 MPa时,3个指标均为较高值。分析表明,成型压力对抗压强度影响显著。

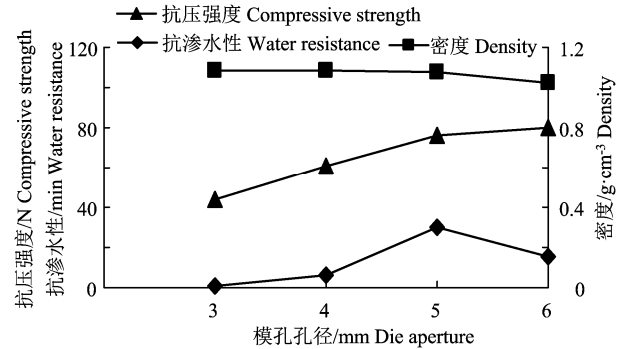


图 6 模孔孔径单因素试验结果

Figure 6 Single factor test results of die aperture

2.1.5 模孔孔径 选定成型压力为10 MPa,竹炭含量为50%,粘结剂种类为可溶性淀粉,粘结剂添加量为15%,分别对挤压孔径3、4、5和6 mm 4个水平进行考察。试验结果,如图6所示。

从图6中可以看出,模孔孔径的增大,可使密度略微减小;可使抗渗水性先增后减,在5 mm时达到最大。抗压强度则随孔径的增大而先快速增大,后缓慢增大。方差分析表明,模孔孔径对抗压强度和抗渗水性影响显著。

表 1 因素水平

Table 1 Factor and level

| 水平 Level | A 竹炭含量/% Bamboo charcoal content | B 粘结剂种类 Binder type | C 粘结剂添加量/% Binder adding amount | D 成型压力/MPa Forming pressure | E 模孔孔径/mm Die aperture |
|----------|----------------------------------|---------------------|---------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| 1 | 50 | 可溶性淀粉 | 10 | 5 | 4 |
| 2 | 60 | 木质素磺酸钠 | 15 | 7.5 | 5 |
| 3 | 70 | 海藻酸钠 | 20 | 10 | 6 |

2.2 正交试验

依据单因素试验结果,设计正交试验。因素与水平如表1所示。不考虑交互作用,选用L₁₈(3⁷)正交表^[28]。正交试验结果见表2,极差分析见表3。

极差分析表明,各因素对3个指标的影响程度并不一样。对于抗渗水性,因素主次顺序为B、C、E、D和A,相应的最优组合为A₁B₂C₁D₃E₂;对于密度,因素主次顺序为B、A、E、C和D,相应的最优组合为A₁B₂C₃D₂E₁;对于抗压强度,因素主次顺序为B、C、E、D和A,相应的最优组合为A₁B₃C₃D₃E₃。

运用综合平衡法能够获得1个对3个指标都较合适的方案。因素A:3个指标均以A₁为最好水平,

所以取A₁。因素B:因素B对3个指标都是最重要的,而且对于抗渗水性和密度这2个指标均为取B₂好,因此取B₂。因素C:对于抗渗水性和抗压强度这两个指标,C都是第2重要的因素,分别取C₁、C₃时好;对于密度而言,因素C是第4重要的因素,取C₃好,综合考虑取C₃。因素D:因素D对抗渗水性和抗压强度比密度更重要,同时,对于抗渗水性和抗压强度都是取D₃好,所以取D₃。因素E:因素E对抗渗水性、密度、抗压强度这3个指标的重要程度一样,分别以E₂、E₁和E₃为最佳水平。但当取E₂时,密度和抗压强度的值略低于各自取最佳水平时的值,所以取E₂较合适。

经过综合平衡,得到优方案为:A₁B₂C₃D₃E₂,

即竹炭含量 50%、粘结剂为木质素磺酸钠、粘结剂添加量为 20%、成型压力为 10 MPa、模孔孔径为 5 mm。验证试验表明, 此参数条件下, 抗压强度为

36.90 N, 密度为 $1.190 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 抗渗水性为 93.45 min, 与正交表中试验结果作比较, 此方案得到的生物炭基肥综合性能最佳。

表 2 正交试验结果
Table 2 Orthogonal test results

| 试验号 Test No. | A | B | 空列 Vacant column | C | D | 空列 Vacant column | E | 抗渗水性/min Water resistance | 密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ Density | 抗压强度/N Compressive strength |
|-----------------|---|---|---------------------|---|---|---------------------|---|------------------------------|--|--------------------------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2.37 | 1.060 | 27.22 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 38.93 | 1.107 | 12.17 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 14.12 | 0.844 | 160.13 |
| 4 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1.30 | 0.996 | 43.42 |
| 5 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 24.58 | 1.127 | 4.23 |
| 6 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 2 | 2 | 0.50 | 0.782 | 32.13 |
| 7 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 | 1.45 | 0.931 | 25.99 |
| 8 | 3 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 35.30 | 1.069 | 8.07 |
| 9 | 3 | 3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 2 | 15.03 | 0.867 | 91.47 |
| 10 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | 2 | 1 | 0.92 | 1.050 | 31.75 |
| 11 | 1 | 2 | 1 | 1 | 3 | 3 | 2 | 223.35 | 1.067 | 10.35 |
| 12 | 1 | 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 3 | 1.27 | 0.795 | 50.42 |
| 13 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | 2.60 | 0.975 | 52.55 |
| 14 | 2 | 2 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | 147.62 | 0.986 | 7.25 |
| 15 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1.00 | 0.795 | 54.34 |
| 16 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 1 | 2 | 56.54 | 0.935 | 60.55 |
| 17 | 3 | 2 | 1 | 3 | 1 | 2 | 3 | 33.87 | 1.004 | 10.53 |
| 18 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 1 | 0.60 | 0.769 | 20.99 |

表 3 极差分析
Table 3 Range analysis

| | | A | B | C | D | E |
|--|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 抗渗水性/min Water resistance | K_1 | 280.96 | 65.18 | 375.89 | 75.91 | 64.77 |
| | K_2 | 177.60 | 503.65 | 134.34 | 149.14 | 336.95 |
| | K_3 | 142.79 | 32.52 | 91.12 | 321.04 | 199.63 |
| | R | 138.18 | 471.12 | 284.76 | 245.16 | 272.16 |
| 密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ Density | K_1 | 5.923 | 5.947 | 5.595 | 5.685 | 5.870 |
| | K_2 | 5.661 | 6.125 | 5.697 | 5.775 | 5.733 |
| | K_3 | 5.575 | 4.852 | 5.867 | 5.699 | 5.556 |
| | R | 0.348 | 1.272 | 0.270 | 0.090 | 0.312 |
| 抗压强度/N Compressive strength | K_1 | 292.04 | 241.48 | 123.93 | 180.92 | 146.60 |
| | K_2 | 193.92 | 52.60 | 228.97 | 207.05 | 259.22 |
| | K_3 | 217.60 | 409.48 | 350.66 | 315.59 | 297.74 |
| | R | 98.12 | 356.88 | 226.73 | 134.67 | 151.14 |

3 讨论与结论

柱状竹炭基肥的成型试验表明, 各因素对抗渗水性、密度、抗压强度的影响程度不一致。竹炭含量对密度影响显著, 但对抗渗水性、抗压强度无显著影响; 粘结剂种类对 3 个指标均影响显著; 粘结

剂添加量和模孔孔径均对抗渗水性、抗压强度影响显著, 但均对密度影响不显著; 成型压力对抗压强度影响显著, 但对抗渗水性、密度影响不显著。

运用综合平衡法获得的最优参数组合为: 竹炭含量 50%、粘结剂为木质素磺酸钠、粘结剂添加量为 20%、成型压力为 10 MPa、模孔孔径为 5 mm。

此条件下,成型质量最佳,抗压强度为 36.90 N,密度为 $1.190 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,抗渗水性为 93.45 min。

本研究可为柱状竹炭基肥的挤压造粒制备工艺及成型设备的设计提供参考。

参考文献:

- [1] 彭春艳,罗怀良,孔静. 中国作物秸秆资源量估算与利用状况研究进展[J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(3): 14-20.
- [2] ORAM N J, VOORDE T F J V D, OUWEHAND G J, et al. Soil amendment with biochar increases the competitive ability of legumes via increased potassium availability[J]. *Agr Ecosyst Environ*, 2014, 191(12):92-98.
- [3] LAIRD D A, FLEMING P, DAVIS D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3):443-449.
- [4] OGUNTUNDE P G, ABIODUN B J, AJAYI A E, et al. Effects of charcoal production on soil physical properties in Ghana[J]. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2008, 171(4): 591-596.
- [5] RONDON M A, RAMIREZ J A, LEHMANN J. Greenhouse gas emissions decrease with charcoal additions to tropical soils[C]// *Proceedings of the 3rd USDA Symposium on Greenhouse Gases and Carbon Sequestration*, March 21-24, 2005. Baltimore: 2005: 208.
- [6] VACCARI F P, BARONTI S, LUGATO E, et al. Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat[J]. *Eur J Agron*, 2011, 34(4):231-238.
- [7] 唐光木,葛春辉,徐万里,等. 施用生物黑炭对新疆灰漠土肥力与玉米生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(9): 1797-1802.
- [8] SCHULZ H, GLASER B. Effects of biochar compared to organic and inorganic fertilizers on soil quality and plant growth in a greenhouse experiment[J]. *J PLANT NUTR SOIL SCI*, 2012, 175(3): 410-422.
- [9] 康日峰,张乃明,史静,等. 生物炭基肥料对小麦生长养分吸收及土壤肥力的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2014 (6): 33-38.
- [10] STEINER C, GARCIA M, ZECH W. Effects of charcoal as slow release nutrient carrier on N-P-K dynamics and soil microbial population Pot experiments with ferralsol substrate[M]. *Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision*, 2009: 325-338.
- [11] 钟雪梅,朱义年,刘杰,等. 竹炭包膜对肥料氮淋溶和有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(s1): 154-157.
- [12] KHAN M A, KIM K W, WANG M, et al. Nutrient-impregnated charcoal: an environmentally friendly slow-release fertilizer[J]. *Environ Syst Decis*, 2008, 28(3): 231-235.
- [13] 张雯,耿增超,何绪生,等. 生物质炭基氮肥中试制备工艺与特性分析[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(3): 129-133.
- [14] 马欢欢,周建斌,王刘江,等. 秸秆炭基肥料挤压造粒成型优化及主要性能[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(5): 270-276.
- [15] 王秋静. 木质素在生物质炭尿素肥料中的应用研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- [16] 高海英,何绪生,陈心想,等. 生物炭及炭基硝酸铵肥料对土壤化学性质及作物产量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(10): 1948-1955.
- [17] 原鲁明,赵立欣,沈玉君,等. 我国生物炭基肥生产工艺与设备研究进展[J]. *中国农业科技导报*, 2015, 17(4): 107-113.
- [18] 袁艳文,田宜水,赵立欣,等. 生物炭应用研究进展[J]. *可再生能源*, 2012, 30(9): 45-49.
- [19] 张忠河,林振衡,付娅琦,等. 生物炭在农业上的应用[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(22): 11880-11882.
- [20] 张亚兰,孙金龙,李治宇,等. 木醋液对盐碱土改良效果研究[J]. *中国农机化学报*, 2014, 35(6): 292-295.
- [21] 杜相革,史咏竹. 木醋液及其主要成分对土壤微生物数量影响的研究[J]. *中国农学通报*, 2004, 20(3): 59-59.
- [22] 李忠徽,王旭东. 灌施木醋液对土壤性质和植物生长的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(2): 510-516.
- [23] 平安. 木醋液在农业上的应用及作用机理研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.
- [24] 毛中元,毛炳荣. 脲醛炭基复混肥及其间隙式制备方法: CN104447063A[P]. 2015-03-25.
- [25] 高海英,陈心想,张雯,等. 生物质炭及炭基硝酸铵肥料理化性质研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(2): 14-20.
- [26] 蒋恩臣,王秋静,秦丽元,等. 柱状生物质炭基尿素的成型及性能研究[J]. *东北农业大学学报*, 2015, 46(7): 83-89.
- [27] 中国石油和化学工业学会. 缓释肥料: GB/T 23348-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [28] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 128-129.